

Perancangan Kontroler Neural Network untuk Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC

David Percival, Eka Iskandar, dan Trihastuti Agustinah
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: iskandar@elect-eng.its.ac.id

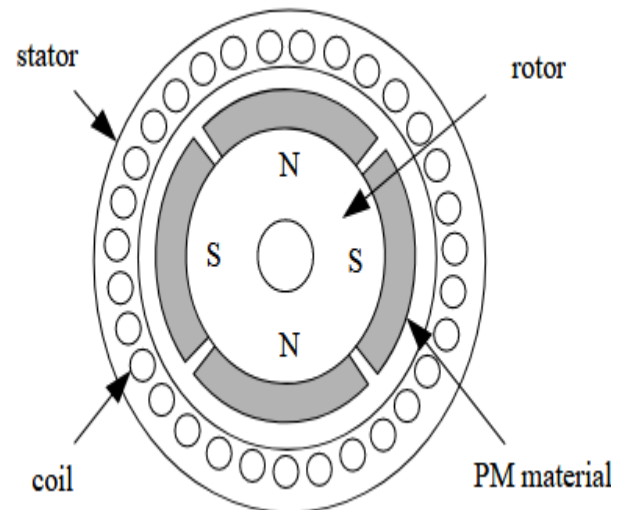
Abstrak—Pada Penelitian Terdahulu Penggunaan Neural Network digunakan dikarenakan kemampuan adaptabilitas dari Neural network terhadap perubahan Plant dan juga kemampuan dari NN untuk mempelajari data secara real-time. Penelitian ini bertujuan merancang kontroler Neural Network untuk meningkatkan sistem pengaturan kecepatan motor DC. Dalam era modern ini, motor DC menjadi komponen vital dalam berbagai aplikasi, termasuk otomotif dan industri. Peningkatan kompleksitas sistem memerlukan pendekatan kontrol yang lebih canggih, dan Neural Network muncul sebagai solusi yang potensial. Penelitian ini memfokuskan pada analisis perbandingan antara kontroler Neural Network dan metode tradisional dalam konteks pengaturan kecepatan motor DC. Pendekatan machine learning dan deep learning, terutama Neural Network, dievaluasi untuk memahami kemampuan mereka dalam meningkatkan kinerja pengaturan kecepatan. Eksperimen dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai parameter seperti jumlah lapisan tersembunyi, fungsi aktivasi, dan variasi dataset. Dalam tahap awal, metode Neural Network berhasil menunjukkan peningkatan signifikan dalam respons sistem, mengatasi beberapa tantangan yang dihadapi oleh kontroler konvensional. Hasil analisis mendalam mencakup efisiensi kontroler Neural Network dalam mengatasi ketidakpastian dan fluktuasi lingkungan. Selain itu, pendekatan ini memberikan hasil yang lebih baik dalam hal adaptabilitas terhadap perubahan keadaan operasional motor DC. Meskipun memerlukan pelatihan awal yang cermat, kontroler Neural Network menunjukkan potensi untuk meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan dan meningkatkan presisi pengaturan kecepatan. Dari Penelitian Ini diharapkan dapat mendapat kontrol kecepatan motor BLDC yang lebih optimal dari penelitian sebelumnya dengan adaptasi jika terjadi perubahan kondisi.

Kata Kunci—Neural Network, Brushless DC Motor, Kontroler, Kontrol Sistem.

I. PENDAHULUAN

PADA dunia Industri, Teknologi instrumentasi merupakan salah satu bagian yang akan terus berkembang. Keberhasilan suatu sistem untuk menghasilkan produk yang di inginkan dapat dilakukan dengan melakukan pengendalian sistem, sehingga instrumen yang dikendalikan dapat berjalan dengan stabil dan efisien. Salah satu instrumen yang digunakan adalah motor Listrik.

Motor listrik merupakan salah satu instrumen yang sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari salah-satu contohnya adalah motor *Direct Current* (DC) yang pada umum dapat ditemukan di dalam peralatan yang dapat ditemukan dalam perangkat listrik sehari-hari seperti kendaraan sampai mesin-mesin yang digunakan dalam sektor Industri. Salah satu jenis motor listrik yang sering digunakan adalah *Brushless Direct Current* (BLDC) yang merupakan jenis inovasi yang dibuat dalam industri motor listrik. BLDC memiliki keuntungan dimana torsi yang dihasilkan lebih besar daripada umumnya, suara yang halus, dan menghasilkan daya yang besar. Hal ini



Gambar 1. Konstruksi motor BLDC.

dikarenakan BLDC menggunakan magnet permanen di tengah motor yang berfungsi sebagai stator yang akan menghasilkan elektromagnetik dengan berputarnya stator.

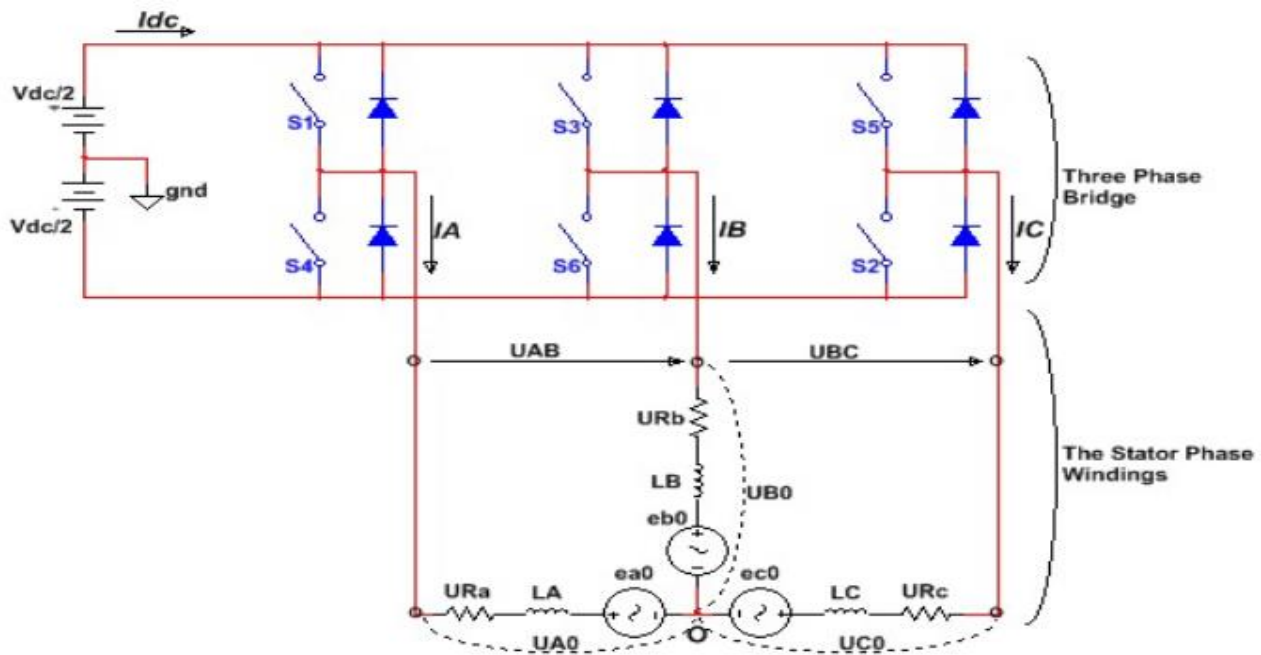
Salah satu Pengaturan BLDC yang dapat dilakukan adalah mengatur kecepatan berputarnya motor. Dalam perkembangan saat ini terdapat banyak cara untuk mengatur kecepatan motor BLDC, seperti menggunakan *Adaptive Control*, *Fuzzy Control*, dan *Neural Network* [1]. Neural Network (NN) adalah suatu sistem yang melakukan proses terhadap informasi yang diberikan dan memiliki karakteristik yang serupa dengan biological neural network (jaringan saraf biologis) pada manusia.

Neural Network dapat dijelaskan sebagai model abstrak yang terdiri dari *neuron* atau node yang dapat mengambil informasi dari luar node ataupun node lainnya yang kemudian dibagikan ke neuron neuron lainnya atau sebagai output. Node yang terdapat pada *Neural Network* juga dibagi menjadi *Node Input*, *Node Output*, *Hidden Node* [1]. Neural Network memiliki berbagai tipe diantaranya adalah *Feedforward Neural Network*, *Convolutional Neural Network*, dan *Recurrent Neural Network*. Kesulitan dalam penggunaan metode NN adalah modifikasi dari parameter Neural Network.

II. KONSTRUKSI MOTOR BLDC

Konstruksi motor BLDC pada umumnya terdiri dari 1-3 fasa. Prinsip utama motor BLDC adalah penggantinya komutator mekanik atau brush magnet yang ada pada motor DC tradisional dengan sirkuit switch elektronik, dengan prinsip tersebut maka konstruksi umum motor BLDC terdiri dari unit pemacu, stator dan rotor (Gambar 1 dan Gambar 2).

Motor BLDC memiliki dua komponen utama pada inti



Gambar 2. Model dinamika motor BLDC 3 fasa.

Tabel 1.
Spesifikasi Motor BLDC

Parameter	Nilai
Work Voltage	7.4-15 VDC
Rotation Speed per Volt (I/K _r)	910 rpm/V
Internal resistance (R _a =R _b =R _c)	63 x 10 ⁻³ Ohm
Shaft Radius (Rotor section)	5 x 10 ⁻³ m
Motor weight (M)	0.102 Kg

Tabel 2.
Perbandingan Hasil Percobaan Kecepatan Motor BLDC

Parameter	Referensi	Neural Network	PID
Settling time	0.2 ms	0.8 ms	1.5 s
Overshoot	0	0	0.213%

motor, yaitu rotor dan stator, bagian yang terdapat pada motor BLDC magnet rotor dan gulungan stator. Rotor adalah bagian motor yang bergerak dikarenakan adanya medan elektromagnet dari stator. Rotor memiliki konstruksi dari dua jenis magnet permanen, yaitu magnet utara (N) dan magnet Selatan (S) dari 2 sampai 8 pasang magnet permanen dari kebutuhan seberapa rapat medan elektromagnetik yang dibutuhkan. Pada umumnya, magnet permanen pada rotor terbuat dari magnet ferrite [1].

Berdasarkan konstruksi dasar dari motor BLDC, motor BLDC dapat dibagi menjadi dua yaitu motor outrunner dan inrunner. Motor *outrunner* adalah jenis motor BLDC dengan letak rotor diluar motor sehingga bagian motor yang berputar terdapat diluar sedangkan motor inrunner adalah jenis motor BLDC dengan letak rotor didalam motor.

Stator adalah bagian motor yang tidak bergerak yang berfungsi sebagai tempat berputarnya medan pada motor DC untuk menghasilkan medan elektromagnet untuk rotor. Stator terbuat dari susunan baja yang memiliki Kumparan pada setiap slotnya. Kumparan 3 fasa yang ada di rotor motor BLDC terletak pada bagian ini. Berdasarkan konstruksi dasar dari motor BLDC, kumparan stator motor BLDC dapat dibagi menjadi trapezoidal dan sinusoidal.

Fasa stator pada motor bldc dapat dituliskan dengan persamaan matematis

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= R_a i_a + L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + e_a \\
 V_{bn} &= R_b i_b + L_{ba} \frac{di_a}{dt} + L_{bb} \frac{di_b}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + e_b \\
 V_{cn} &= R_c i_c + L_{ca} \frac{di_a}{dt} + L_{cb} \frac{di_b}{dt} + L_{cc} \frac{di_c}{dt} + e_c
 \end{aligned}$$

Dimana nilai R adalah hambatan resistansi, L adalah hambatan induktansi dan e adalah hambatan emf.

Voltase stator dari motor BLDC 3 fasa ddengan nilai arus $i_a + i_b + i_c = 0$, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

Persamaan torsi elektromagnetik dituliskan

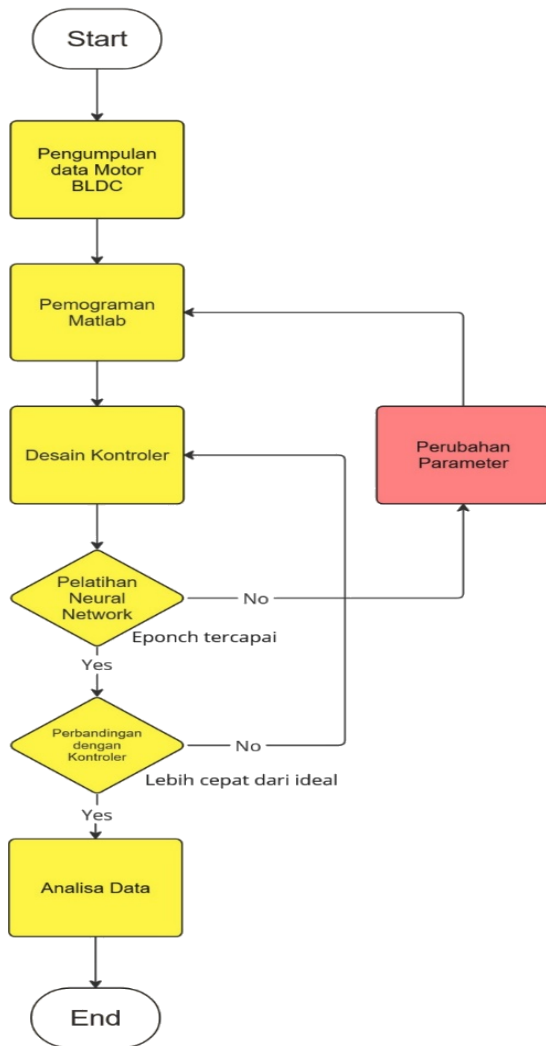
$$T_e = \frac{(e_a \times i_a) + (e_b \times i_b) + (e_c \times i_c)}{\omega_m}$$

Persamaan torsi motor dituliskan

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m$$

Persamaan kecepatan angular motor dituliskan

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{P}{2} \omega$$



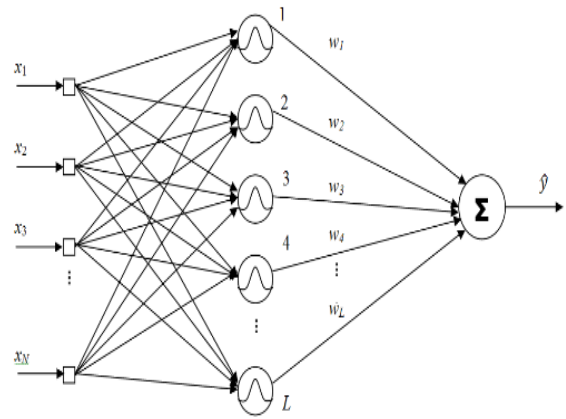
Gambar 3. Flowchart penelitian.

Persamaan kecepatan angular (7) dapat menggunakan posisi angular rotor dapat digunakan untuk menganalisa nilai fasa tegangan pada saat positif, negatif, dan nol. Dengan demikian, Persamaan (4), (5) dan (7) merupakan persamaan diferensial model matematikamotor BLDC.

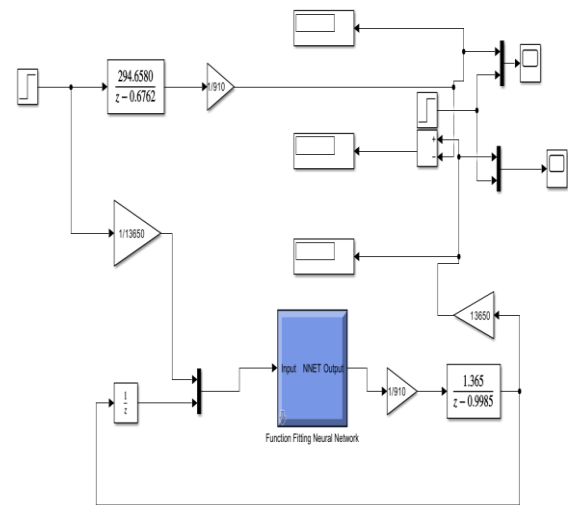
III. PRINSIP KERJA MOTOR BLDC

Motor BLDC memiliki prinsip kerja yang menggunakan gaya tarik menarik antara medan elektromagnet yang terdapat di stator dan magnet permanen pada rotor [2]. Hal ini memanfaatkan karakteristik kutub Utara (N) dan Selatan (S) magnet, magnet dengan kutub yang sama akan saling tolak menolak dan magnet dengan kutub berbeda akan saling tarik menarik. Pada bagian stator motor BLDC terdapat kontroler yang berfungsi untuk mengatur aliran arus listrik di stator dan menimbulkan medan elektromagnet. Medan elektromagnet tersebut kemudian di kontrol sehingga sesuai dan dapat memutar magnet yang ada di rotor motor BLDC. Magnet Permanen pada rotor motor BLDC memiliki Kumparan fase yang terhubung ke stator.

Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti jalur Flowchart sesuai dengan Gambar 3 dan parameter motor BLDC yang digunakan pada penelitian ini juga menggunakan spesifikasi motor BLDC sesuai dengan Tabel 1.



Gambar 4. Struktur neural network.



Gambar 5. Pemodelan simulasi dan kontroler.

IV. DESAIN KONTROLER

Neural Network atau *Artificial Neural Network* adalah sistem pengolah informasi adaptif dengan ciri-ciri serupa dengan jaringan saraf biologis manusia. Pada Penelitian ini juga diperlukan pemahaman untuk cara kerja daripada struktur *Neural Network* dan juga kemampuan pada *Neural Network* untuk mencapai pelatihan sehingga dapat digunakan sebagai kontroler, ataupun alat untuk melakukan verifikasi terhadap desain mesin ataupun implementasi yang diinginkan.

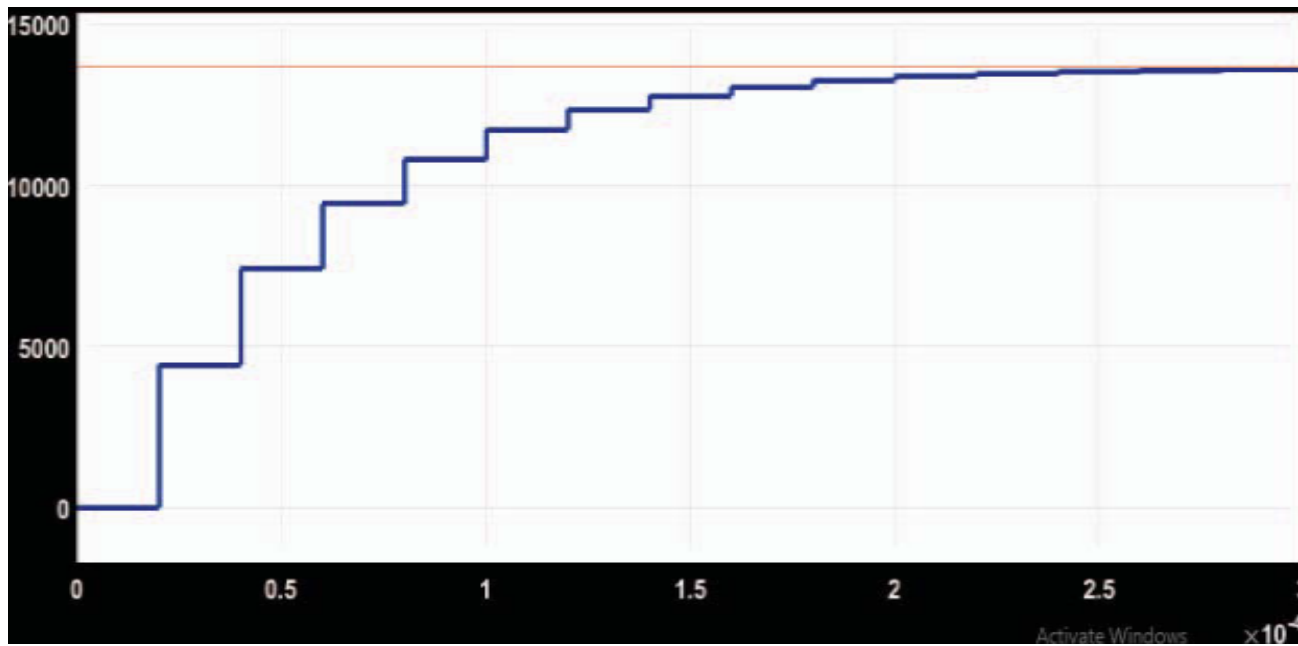
Persamaan yang digunakan pada lapisan tersembunyi *neural network* dengan pemberian beban pada input sehingga didapatkan output yang diinginkan (Gambar 4).

$$Y_L = \sum_{L=1}^n X_N W_{NL}$$

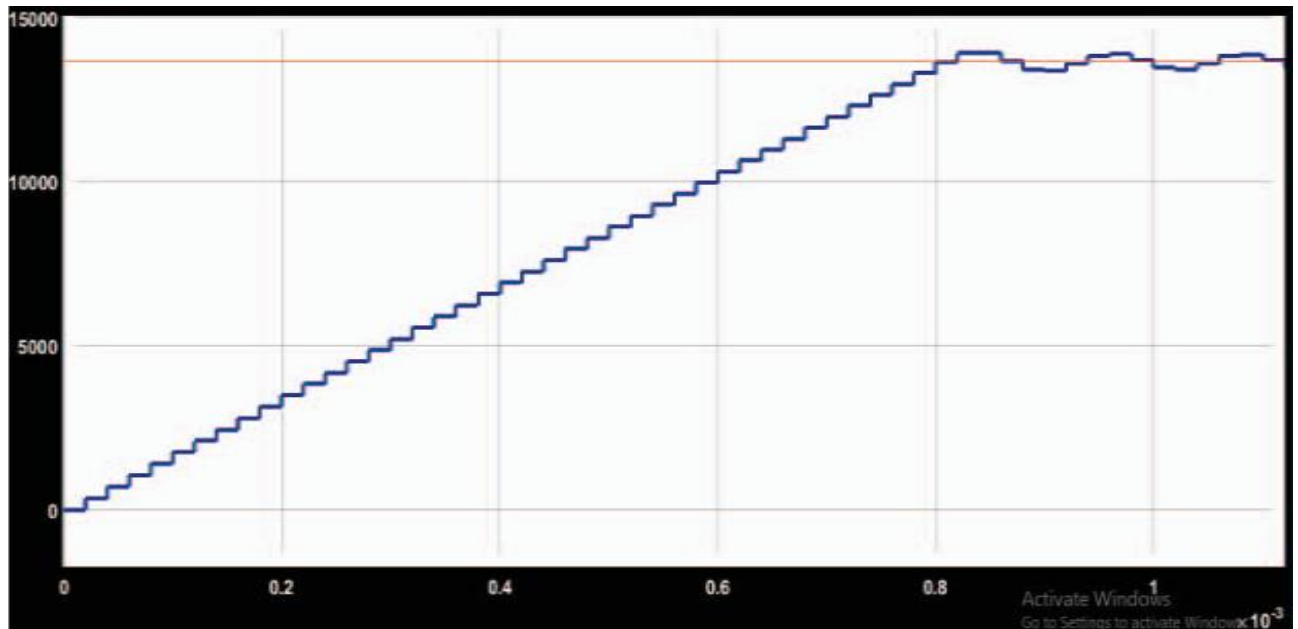
Dimana X_N adalah nilai dari input layer dan W_{NL} adalah jumlah layer yang ada.

V. TRANSFER FUNCTION MOTOR BDLC

Transfer function dari motor BLDC didapatknt dengan mengubah persamaan (4), (5), (6), dan (7) yang akan disumulasikan menjadi motor BLDC. Motor BLDC yang



Gambar 6. Respon motor BLDC ideal.



Gambar 7. Respon motor BLDC dengan neural network.

disimulasikan dianggap memiliki konduksi dua fase dengan Fase A dan Fase B.

$$\begin{aligned} i_a &= -i_b = i \\ \frac{di_a}{dt} &= \frac{-di_b}{dt} = \frac{di}{dt} \end{aligned}$$

Persamaan tengangan listrik antara 2 fasa tersebut dapat dituliskan:

$$u_{AB} = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_A - e_B)$$

Pada saat Fasa A dan Fasa B dinyalakan disaat yang bersamaan, besar dari kedua fasa menjadi sama besar dengan arah yang berlawanan sehingga Persamaan tengangan listrik antara 2 fasa dapat dituliskan dengan persamaan

$$u_{AB} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_A - e_B) + 2e = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + k_e \omega \quad (12)$$

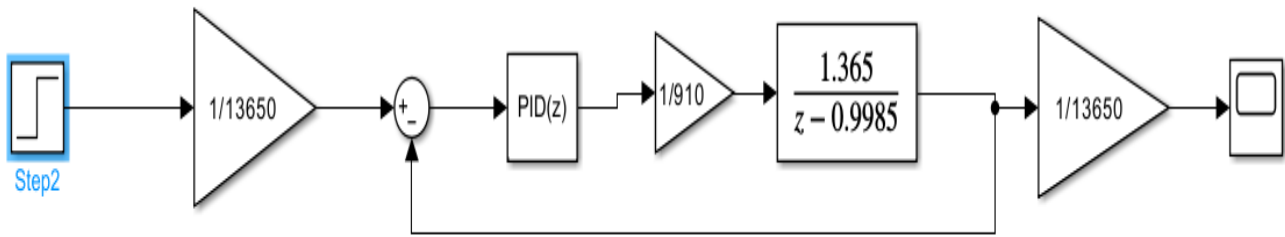
Dimana U_d adalah tegangan DC yang diaplikasikan, r_a adalah hambatan dari 2 fasa ($2R$), L_a adalah induktansi dari winding ($2(L-M)$), K_e koefisien emf. Transfer Function dari motor BLDC memiliki relasi antara tegangan dengan kecepatan angular.

Transfer function tersebut akan didapatkan dengan menyatakan persamaan tegangan dengan persamaan angular.

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega_m}{dt} &= T_e - T_L - B\omega_m \\ T_e - T_L &= J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \\ K_T x i - T_L &= J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \end{aligned}$$

Dengan anggapan nilai T_L adalah 0, maka persamaan diatas dapat dituliskan

$$i = \frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B}{K_T} \omega_m$$



Gambar 8. Contoh simulasi menggunakan PID.

$$U_d = r_a \left[\frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B}{K_T} \omega_m \right] + L_a \frac{d}{dt} \left[\frac{J}{K_T} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B}{K_T} \omega_m \right] + k_e \omega$$

Setelah didapatkan U_d , maka akan diubah kedalam bentuk transfer function persamaan dengan order 1.

$$G_u(s) = \frac{\omega(s)}{U_d(s)} = \frac{K_T}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B) s + (r_a B + K_e K_T)}$$

$$G(s) = \frac{1}{r_a B + K_e K_T} \frac{1}{s t_m + 1}$$

Persamaan *time constant* dengan mengangap induktansi menjadi 0 dapat dituliskan:

$$t_m = \frac{r_a J + L_a B}{r_a B + K_e K_T} = \frac{r_a J}{K_e K_T}$$

Dengan mengangap nilai $K_e = K_T$, maka didapatkan

$$G(s) = \frac{1/K_e}{1 + s \frac{r_a J}{K_e K_T}} = \frac{1/K_T}{1 + s \frac{r_a J}{K_T^2}}$$

Substitusi persamaan dengan parameter motor BLDC untuk digunakan ke kontroler NN dengan spesifikasi pada Tabel 1.

$$G(s) = \frac{910}{1.275 \times 10^{-6} \times 63 \times 10^{-3} \times 910^2 \times s + 1}$$

$$G(s) = \frac{910}{0.0665 \times s + 1}$$

Model dari Motor BLDC dengan transformasi Z akan di hitung secara matematis menggunakan pole zero mapping dengan sampling time 0.001s.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{1.365 Z^{-1}}{1 - 0.9985 Z^{-1}}$$

Transfer function pada Formula (24) akan digunakan pada Simulasi SIMULINK untuk mendapatkan data yang digunakan untuk Pelatihan pada *neural network* dengan memasukan data dari Blok *Random Uniform Number*.

VI. PEMODELAN SIMULASI DAN KONTROLER

Penelitian ini akan dilakukan dengan membandingkan Transfer Function untuk motor BLDC ideal dengan hasil kontroler *neural network*. Pemodelan motor BLDC deal dengan anggapan model yang digunakan adalah model orde satu, dengan persyaratan sebagai berikut [3]:

1. Overshoot = 0
2. Steady state error = 0
3. Settling time = 0.001 detik

Dengan persamaan transfer function berikut

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{T_m s + 1}$$

Motor BLDC ideal ini akan menggunakan unit step sebagai referensi input dengan initial value = 0 dan final value = 13650 rpm, dimana nilai tersebut dijadikan input kecepatan referensi. Menggunakan persamaan *Inverse laplace transformation* untuk mendapatkan persamaan error steady state. Dengan maksimal error ($e^{\frac{-ts}{T_m}}$) adalah $\pm 5\%$ maka persamaan dituliskan

$$Y_m(t) = 1 - e^{\frac{-ts}{T_m}}$$

$$e^{\frac{-ts}{T_m}} = 1 - Y_m(t)$$

$$\ln(0.05) = \frac{-ts}{T_m}$$

$$T_m = \frac{-ts}{\ln(0.05)} = -\frac{0.001}{\ln(0.05)} = 2.9957 \times 10^{-4}$$

Maka model controller referensi adalah

$$G_m(s) = \frac{910}{2.9957 \times 10^{-4} \times s + 1}$$

Akan dilakukan transformasi Z dengan metode pole zero mapping dapat dituliskan

$$\frac{Y_m(z)}{R(z)} = \frac{294.6580}{z - 0.6762}$$

Pada pengontrolan motor BLDC dengan *neural network* akan diberikan. Diberi delay pada loop pengontrolan. Hal ini dilakukan untuk mengatur kontroler *neural network* memiliki step yang sama dengan input yang diberikan (Gambar 5). Training dari *neural network* dilakukan dengan kondisi motor BLDC pada umumnya yang kemudian akan dibandingkan dengan pemodelan motor BLDC ideal.

VII. HASIL SIMULASI

Hasil simulasi dari model Gambar 5, dan menunjukan perbandingan hasil respon dari Motor BLDC ideal dan Motor BLDC dengan Kontroler BLDC dengan kecepatan di atur pada 13650 rpm. Simulasi dilakukan setelah block *neural*

network sudah melakukan pelatihan dengan data yang didapatkan dari transfer function motor BLDC.

Kontroler dengan *neural network* berhasil mempercepat motor untuk mencapai settling time yang diinginkan dengan mengatur kecepatan sesuai dengan pelatihan yang telah diberikan di Neural Network (Gambar 6). Dalam percobaan ini dapat dilihat bahwa kecepatan yang ingin dicapai adalah 13650 rpm. Dari hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa nilai daripada simulasi BLDC dan kecepatan tercapai tanpa overshoot dalam waktu 0.2 mili sekond. Nilai motor BLDC ideal sehingga dapat nilai maksimal untuk motor BLDC ideal.

Dalam percobaan pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa kecepatan yang ingin dicapai adalah 13650 rpm. Dari hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa nilai daripada simulasi BLDC dan kecepatan tercapai dengan sedikitnya overshoot pada kecepatan 0.8 mili sekond. Percobaan ini membuktikan bahwa nilai dari percobaan, dapat dibuktikan bahwa pengontrolan dengan lebih baik daripada motor BLDC yang dijadikan sebagai Referensi untuk mengontrol Motor BLDC.

Pada Percobaan pada Gambar 7 dilakukan perbandingan dengan PID sesuai dengan hasil perbandingan dengan model sesuai pada Gambar 8. Percobaan pada Gambar 8 menggunakan PID paralel dengan bentuk sebagai berikut dengan time domain diskrit dengan persamaan berikut :

$$P + I.T_s \frac{1}{z-1} + D \frac{N}{1 + N.T_s \frac{1}{z-1}}$$

Setelah melakukan percobaan pada Gambar 8, didapatkan nilai k_p , k_i , k_d yang akan dipakai pada penelitian ini adalah $K_p = 11$, $K_i = 55$, $K_d = 1.3$. Hasil dan perbandingan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa pengontrolan dengan *neural network* lebih mendekati kondisi settling time ideal dari pada dengan menggunakan kontroler PID tanpa adanya overshoot pada kontroler dengan *neural network* dan overshoot pada kontroler PID sebesar 0.213%.

VIII. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas tentang kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan Neural network pada Matlab. Penelitian ini berkontribusi untuk memperluas kemungkinan cara untuk mengontrol kecepatan motor BLDC ataupun, pada sistem dengan orde 1. Hasil rancangan dari kontroler menggunakan neural network adalah tidak terdapat overshoot pada sistem dan sistem mencapai kestabilan pada 0.8 mili detik, dimana pada kondisi ideal motor BLDC akan memakai 0.2 mili detik. Dapat dibuat kesimpulan bahwa, kontroler dengan neural network bekerja lebih efektif dan dekat dengan kontroler dari motor BLDC ideal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*, 1st ed. Singapore: John Wiley & Sons Ltd, 2012. ISSN: 978-1-118-18833-0.
- [2] H. Jie, G. Zheng, J. Zou, X. Xin, and L. Guo, "Speed regulation based on adaptive control and RBFNN for PMSM considering parametric uncertainty and load fluctuation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 190147–190159, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031969.
- [3] T. R. Sharma and Y. Pal, "Direct torque control of bldc drives with reduced torque pulsations," in *2019 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, pp. 1242–1247. India: 12-14 June 2020, doi: 10.1109/ICECA.2019.8822141.